

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Кафедра экспериментальной физики и инновационных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Москалев А.К.
« _____ » _____ 2017г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

27.03.05 – «Инноватика»

«Экономический анализ применения дистанционного зондирования Земли для
целей пожаробезопасности»

Руководитель	_____	<u>профессор, к.ф.-м.н.</u>	А.К. Москалев
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Студент	_____		Н.В. Имехенова
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2017

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Экономический анализ применения дистанционного зондирования Земли в целях пожаробезопасности» содержит 50 страниц текстового документа, 5 иллюстраций, 3 формулы, 10 таблиц, 33 использованных источников.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ, ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ.

Объектом исследования является дистанционное зондирования Земли в целях пожаробезопасности.

Целью данной работы является провести экономический анализ применения усовершенствованного способа обнаружения лесного пожара из космоса.

Предмет исследования – новый метод обнаружения лесного пожара из космоса.

Проведен обзор, а также сравнительный анализ способов мониторинга лесных пожаров методом комплексной оценки, что позволило определить наиболее оптимальный способ определения лесного пожара по выбранным критериям. Рассмотрен новый метод дистанционного обнаружения лесного пожара на основе опубликованного патента. Данный метод по полученной информации о нагретых при температуре пожара атмосферных газах в ИК-диапазоне спектра обеспечивает исключение ложной идентификации пожаров и увеличение чувствительности в условиях плотной облачности.

Выполнен расчет экономического эффекта от внедрения когерентного приемника в узком спектральном интервале, совпадающем с линией излучения атмосферного газа в «горячей» колебательно-вращательной полосе спектра.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лесная пирология	6
1.1 Причины возникновения лесных пожаров и их классификация	7
1.2 Возможности дистанционного зондирования Земли	11
1.3 Способы мониторинга лесных пожаров	16
2 Сравнительный анализ способов дистанционного обнаружения лесных пожаров	28
2.1 Методы анализа способов дистанционного обнаружения лесных пожаров	28
2.2 Сравнительный анализ способов дистанционного обнаружения лесных пожаров	32
3 Экономический анализ применения ДЗЗ в целях пожаробезопасности	36
3.1 Выбор метода детектирования лесного пожара со спутника	36
3.2 Экономический анализ	39
3.2.1 Исключение «ложной» информации	39
3.2.2 Плотная облачность	42
Заключение	45
Список использованных источников	47

ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары являются мощным природным и антропогенным фактором, существенно изменяющим функционирование и состояние лесов. Лесные пожары наносят урон экологии, экономике, а часто и человеческие жизни оказываются под угрозой. Для России, где леса занимают 70% от общей территории, лесные пожары являются национальной проблемой, а ущерб, наносимый реальному сектору экономики, исчисляется десятками и сотнями миллионов долларов в год.

Для восстановления леса требуется несколько десятков лет и несколько поколений лесничих. В случае, когда промышленные объекты находятся в непосредственной близости от леса, ущерб от пожара может быть колоссальным. Но наибольшую опасность представляет угроза населенным пунктам, когда лесной пожар может стать причиной смерти людей.

Пожары – основная причина гибели лесов. За период 2015-2016 год в Российской Федерации погибло 489 тыс. га лесных насаждений (в среднем 150 тыс. га в год) [1]. Из этой площади 61,3% погибло от пожаров, 15,7% – от повреждения вредными насекомыми, 12% – от воздействия неблагоприятных погодных условий и 11% пришлось на весь комплекс прочих факторов (болезни, повреждения дикими животными, антропогенные факторы).

Если оценить расходы на тушение лесных пожаров в России, то в 2015 году сумма ущерба составила 56 млрд. руб., из них 54 млрд. руб. или 96,7% на Сибирский федеральный округ, в том числе ущерб по Республике Бурятия составил 43 915,7 млн. рублей или 77,9 %, по Иркутской области – 8 024,2 млн. рублей или 14,2 %, по Забайкальскому краю – 427,9 млн рублей или 0,8%. [2]

Следует заметить, что реальный экономический ущерб от лесного пожара складывается не только из урона нанесенного лесу, промышленным и другим объектам, но и из затрат, связанных непосредственно с тушением. В этом

случае становится очевидным, что важно не только обнаружить пожар, но и определить его точное местоположение и сделать это как можно раньше.

Объектом исследования является дистанционное зондирования Земли в целях пожаробезопасности.

Предмет исследования – новый метод обнаружения лесного пожара из космоса.

Целью данной работы является провести экономический анализ применения усовершенствованного способа своевременного обнаружения лесного пожара из космоса.

Для реализации цели были поставлены следующие задачи:

- описание способов мониторинга лесных пожаров;
- сравнительный анализ способов мониторинга лесных пожаров;
- описание предлагаемого метода обнаружения лесного пожара;
- расчет экономического эффекта от применения предлагаемого метода обнаружения лесного пожара из космоса.

1. Лесная пирология

Для Российской Федерации лес имеет огромное значение, так как лесной фонд занимает более половины территории страны. Россия занимает особое, уникальное положение. При площади около 1690 млн. га на её территории находятся пятая часть всех лесов мира и половина мировых хвойных лесов. Общая площадь лесного фонда и лесов, не входящих в него, составляет в России около 1178,6 млн га. Это приблизительно 70% от всей территории страны. В лесах РФ сосредоточены самые большие запасы древесины в мире - почти 80 млрд. м³, из которых 85% приходится на наиболее ценную хвойную древесину [3]. Лесными пожарами на территории страны ежегодно охватывается приблизительно от 2 до 5 млн. га лесной площади [4]. Лесные пожары возникают главным образом в результате неосторожного обращения с огнем. Доля пожаров естественного происхождения в сравнении с пожарами, вызванными антропогенной деятельностью мала. Пожары проще предупредить, чем ликвидировать, однако в нашей стране недостаточно развита система наблюдения за лесом, что приводит к несвоевременному оповещению о возникновении пожара.

При лесных пожарах существует угроза уничтожения примыкающих к лесу населенных пунктов и предприятий (возгорание складов древесины, деревянных домов и других хозяйственных объектов). В результате происходит уничтожение древесины, в том числе ценных пород. Из-за задымленности приземного слоя атмосферы в зоне пожара прекращаются полеты воздушных судов на местных авиалиниях и плавание речных судов. В результате уменьшение дозы солнечной радиации на подстилающую поверхность происходит более позднее созревание сельскохозяйственных культур.

Лесные пожары приводят к разрушению сложившихся экосистем, уничтожению фитомассы лесных биогеоценозов и животных ресурсов. Происходит загрязнение окружающей среды токсичными продуктами горения (выбросы вредных химических веществ в приземный слой атмосферы,

задымленность). Эрозия почв, уменьшение речного стока, опустынивание земель – все это является последствием лесного пожара. Наблюдается нарушение природного углеродного цикла, повышение концентрации диоксида углерода и как следствие – вклад в глобальное потепление климата.

1.1 Причины возникновения лесных пожаров и их классификация

Лесной пожар — это стихийное, неуправляемое распространение огня по лесным площадям.

Существует большое количество классификаций пожаров [5]. Лесные пожары можно классифицировать следующим образом (рис. 1).

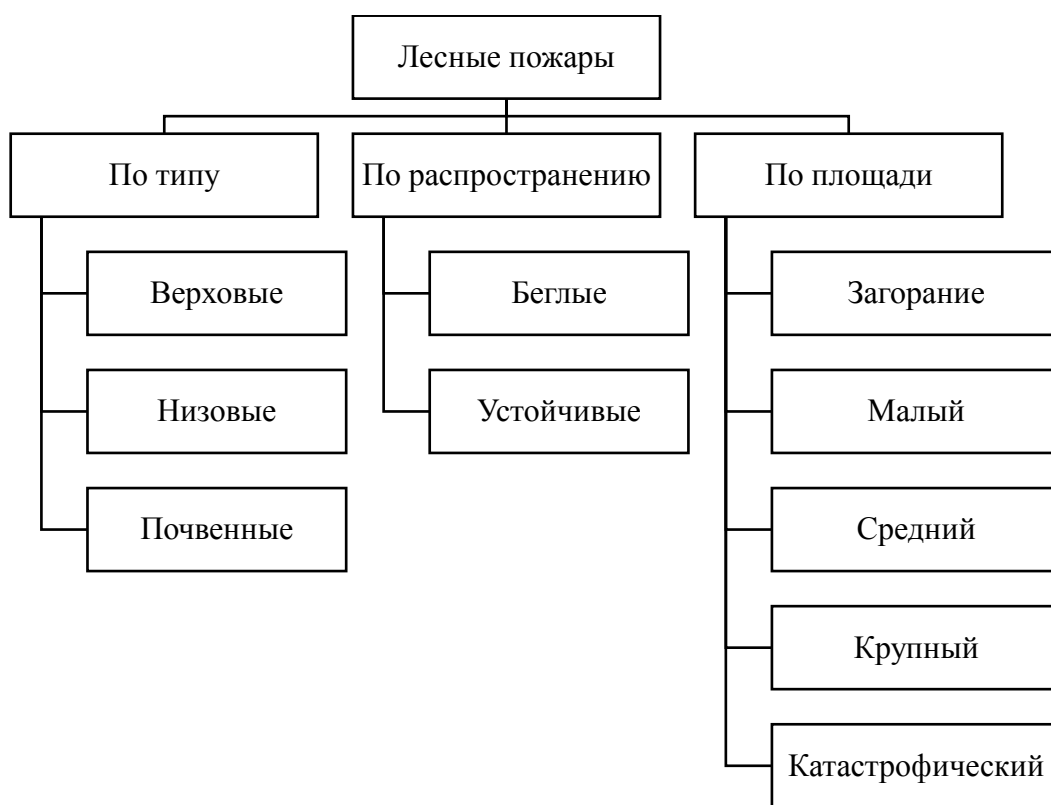


Рисунок 1 – Классификация лесных пожаров [6]

Такая классификация позволяет учесть основные факторы, влияющие на возникновение и развитие лесных пожаров. Так лесные пожары могут быть беглыми (при высокой скорости ветра) и устойчивыми. Отдельно стоит

рассматривать травяные пожары, именуемые иногда, как сельскохозяйственные палы.

При верховом пожаре горят кроны деревьев. Верховые пожары, также как и низовые, подразделяется на беглые и устойчивые. При беглом верховом пожаре огонь быстро распространяется по кронам деревьев в направлении ветра, а при устойчивом (повальном) – огонь распространяется по всему древостою: от подстилки до крон. Горят отдельные деревья и куртины.

Возникновение и развитие верховых пожаров происходит от перехода огня низовых пожаров на кроны хвойных древостоев с низкоопущенными ветвями, в многоярусных с обильным подростом насаждениях, молодняках, а также в горных лесах. Скорость верховых пожаров: устойчивого – 300...1500 м/ч (5...25 м/мин), беглого – 4500 м/ч и более (75 м/мин и более). Верховым пожарам наиболее подвержены хвойные молодняки, заросли кедрового стланика и дуба кустарниковой формы (весной при наличии сухих прошлогодних листьев), в горных лесах – все хвойные насаждения в верхней части крутых склонов и на перевалах. Возникновению верховых пожаров в значительной степени способствуют засухи и сильные ветры.

При низовом пожаре горит лесной опад, состоящий из мелких ветвей, коры, хвои, листьев, лесная подстилка, сухая трава, живой напочвенный покров из трав, мхов, мелкий подрост и кора в нижней части древесных стволов. По скорости распространения огня и характеру горения низовые пожары, так же как и верховые бывают беглыми и устойчивыми. Беглый низовой пожар развивается чаще всего в весенний период, когда подсыхает лишь самый верхний слой мелких горючих материалов напочвенного покрова и прошлогодняя травянистая растительность. Скорость распространения огня довольно значительна – примерно от 180 до 300 м/ч (3-5 м/мин) и находится в прямой зависимости от скорости ветра в приземном слое. Лесная подстилка сгорает на 2-3 см. При этом участки с повышенной влажностью напочвенного покрова остаются нетронутыми огнем и площадь, пройденная беглым огнем, имеет пятнистую форму. Устойчивый низовой пожар характеризуется полным

сгоранием напочвенного покрова и лесной подстилки. Устойчивые низовые пожары развиваются в середине лета, когда подстилка просыхает по всей толщине залегания. На участках, пройденных устойчивым пожаром, полностью сгорает лесная подстилка, подрост и подлесок. Обгорают корни и кора деревьев, в результате чего насаждение получает серьезные повреждения, а часть деревьев прекращает рост и гибнет. Скорость распространения огня при устойчивом низовом пожаре от нескольких метров в час до 180 м/ч (1-3 м/мин). По высоте пламени горения кромки низовые пожары характеризуются как слабые (высота пламени до 0,5 м), средние (высота пламени до 1,5 м) и сильные (высота пламени более 1,5 м) [7].

Отдельно стоит рассматривать травяные пожары (сельскохозяйственные палы) - сжигание сухой травы на сельскохозяйственных угодьях, лугах и пастбищах, в долинах рек. Обычно травяные пожары возникают в весенний период. При травяных палах горит прошлогодняя сухая трава и стерня, оставленная в поле. Скорость распространения пожара зависит от скорости ветра. При сильном пожаре огонь движется быстро и бегло. Часто в увлажнённых местах часть травы остаётся нетронутой огнём, а отдельные куртины – непрогоревшими. При слабом ветре - скорость распространения значительно меньше. При этом выгорает вся сухая трава. Высота пламени от нескольких сантиметров на стерне до 1-1,5 м на залежи. До 3-5 м при горении тростника. Травяные пожары – основная причина возникновения значительно более разрушительных пожаров в лесах и на торфяниках. Почвенный пожар развивается в результате “заглубления” огня низового пожара в подстилку и торфяной слой почвы. Почвенные пожары подразделяются на подстилочно-гумусный, при котором горение распространяется на всю толщину лесной подстилки и гумусного слоя, и подземный или торфяной при котором горение распространяется по торфянистому горизонту почвы или торфяной залежи под слоем лесной почвы. При таком пожаре сгорают корни, деревья вываливаются и падают, как правило, вершинами к центру пожара. Пожарище в большинстве случаев имеет круглую или овальную форму. Скорость распространения огня

незначительна – от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров в сутки.

Характеристики основных типов пожаров сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристика лесных пожаров [8]

Параметры пожара	Значения показателей силы пожара		
	Слабого	Среднего	Сильного
Низовой пожар			
Скорость распространения огня, м/мин	До 1	1-3	Более 3
Высота пламени, м	До 0,5	0,5-1,5	Более 1,5
Верховой пожар			
Скорость распространения огня, м/мин	До 3	3-100	Более 100
Подземный пожар			
Глубина прогорания, см	До 25	25-100	Более 50

Классификация пожаров по площади определяет:

- загорание (огнём охвачено 0,1-2 гектара);
- малый (2-20 га);
- средний (20-200 га);
- крупный (200-2000 га);
- катастрофический (более 2000 га).

Также в отдельных случаях пожары классифицируют с точки зрения работ, связанных с локализацией и тушением пожара, а также спасением людей и материальных ценностей по трем основным зонам: отдельных пожаров; массовых и сплошных пожаров; пожаров и тлениях в завалах.

1.2 Возможности дистанционного зондирования Земли

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – получение информации о поверхности Земли и объектах на ней, атмосфере, океане, верхнем слое земной коры бесконтактными методами, при которых регистрирующий прибор удален от объекта исследований на значительное расстояние.

Физическая основа дистанционного зондирования - функциональная зависимость между зарегистрированными параметрами собственного или отраженного излучения объекта и его биогеофизическими характеристиками и пространственным положением. С помощью дистанционного зондирования изучают физические и химические свойства объектов.

Предмет ДЗЗ, как науки - пространственно-временные свойства и отношения природных и социально-экономических объектов, проявляющиеся прямо или косвенно в собственном или отраженном излучении, дистанционно регистрируемом из космоса или с воздуха в виде двумерного изображения – снимка.

Методы ДЗ основаны на использовании сенсоров, которые размещаются на платформах и регистрируют электромагнитное излучение в форматах, существенно более приспособленных для цифровой обработки, и в существенно более широком диапазоне электромагнитного спектра. В качестве сенсоров выступает съемочная аппаратура, которая может размещаться на различных платформах. Платформой может быть космический аппарат (КА, спутник), самолет, вертолет и даже простая тренога. На одной платформе может размещаться несколько съемочных устройств, называемых инструментами или сенсорами, что обычно для КА. Например, спутники Ресурс-О1 несут сенсоры МСУ-Э и МСУ-СК, а спутники SPOT – по два одинаковых сенсора HRV (SPOT-4 – HRVIR). Понятно, что чем дальше находится платформа с сенсором от изучаемого объекта, тем больший охват и меньшую детализацию будут иметь получаемые изображения.

Процесс сбора данных дистанционного зондирования и их использование в географических информационных системах (ГИС) изображены на рис. 2.

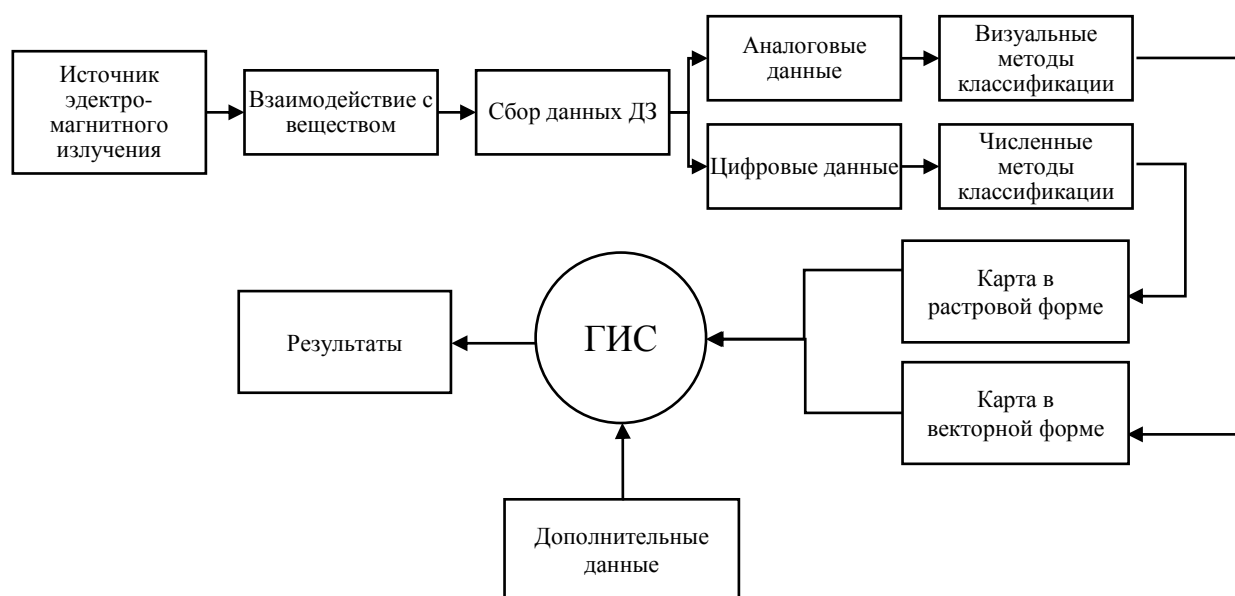


Рисунок 2 – Схема процесса сбора данных ДЗЗ

Регистрироваться может собственное излучение объектов и отраженное излучение других источников. Этими источниками могут быть Солнце или сама съемочная аппаратура. В последнем случае используется когерентное излучение (радары, сонары и лазеры), что позволяет регистрировать не только интенсивность излучения, но также и его поляризацию, фазу и доплеровское смещение, что дает дополнительную информацию. Понятно, что работа самоизлучающих (активных) сенсоров не зависит от времени суток, но зато требует значительных затрат энергии. Таким образом, виды зондирования по источнику сигнала:

- активное (вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия);

- пассивное (собственное, естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью).

Техника получения материалов дистанционного зондирования заключается в том, что аэрокосмическую съемку ведут в окнах прозрачности атмосферы, используя излучение в разных спектральных диапазонах – световом (видимом, ближнем и среднем инфракрасном), тепловом инфракрасном и радиодиапазоне.

Идеальная схема дистанционного зондирования представлена на рис. 3

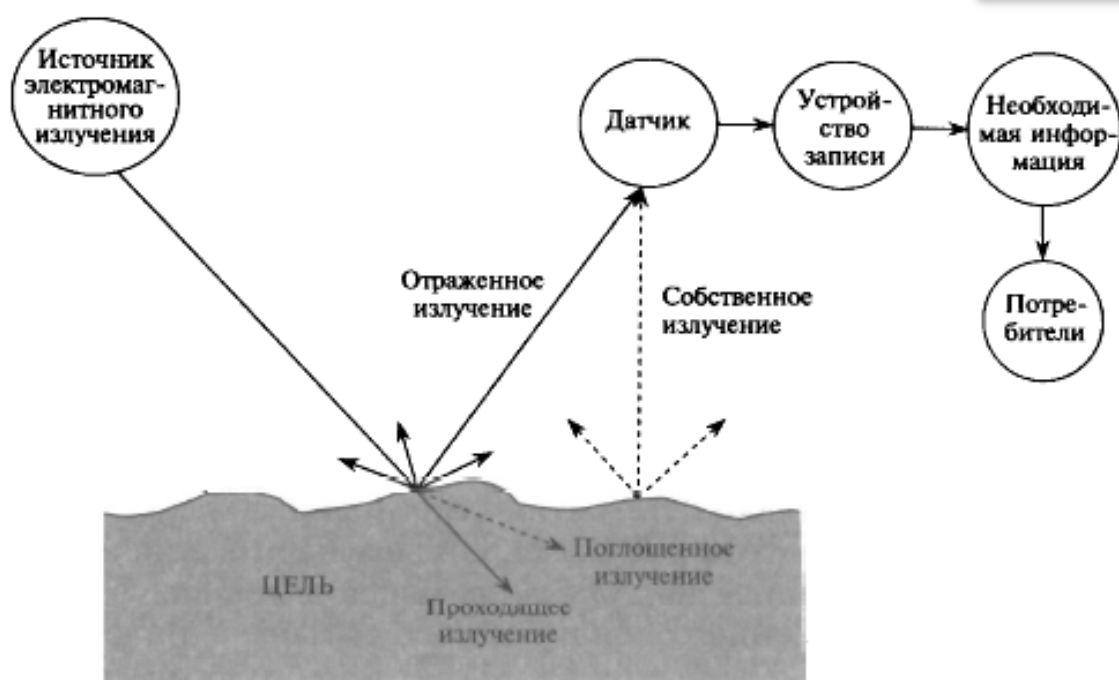


Рисунок 3 – Схема ДЗЗ

Ни один источник не способен обеспечить однородность потока излучения как в пространстве, так и во времени. Из-за взаимодействия излучения с газами атмосферы, молекулами водяного пара и атмосферными частицами изменяется интенсивность излучения и его спектр. Одно и то же вещество при разных условиях может иметь разную спектральную чувствительность. В то же время, спектральная чувствительность разных веществ может совпадать.

На практике не существует идеального сенсора, с помощью которого можно было бы регистрировать все длины волн электромагнитного спектра.

Из-за технических ограничений передача данных и их интерпретация иногда выполняются с задержкой по времени. Потребители могут не обладать необходимой информацией о параметрах сбора данных ДЗ и не иметь достаточного опыта для их анализа и дешифрирования.

Характеристики получаемых снимков, т.е. возможность обнаружить и измерить то или иное явление, объект или процесс зависят от характеристик сенсоров соответственно. Главной характеристикой является разрешающая способность.

Классификация космических снимков по спектральным диапазонам и технологиям получения изображения:

- снимки в видимом, ближнем и среднем инфракрасном (световом) диапазоне (фотографические, ПЗС-сканирование);
- снимки в тепловом инфракрасном диапазоне (тепловые инфракрасные);
- снимки в радиодиапазоне (микроволновые радиометрические, радиолокационные).

Фотосъемка в световом диапазоне характеризуется высокой степенью обзорности, где масштаб съемки зависит от высоты съемки и фокусного расстояния объектива. Спектральный диапазон фотографирования охватывает видимую часть ближней инфракрасной зоны (до 0,86 мкм). Наиболее часто используются многоспектральные оптико-механические системы - сканеры, установленные на ИСЗ различного назначения.

«Сканирование» - развертка изображения при помощи сканирующего элемента, поэлементно просматривающего местность поперек движения носителя и посылающего лучистый поток в объектив и далее на точечный датчик, преобразующий световой сигнал в электрический. Этот электрический сигнал поступает на приемные станции по каналам связи. Изображение местности получают непрерывно на ленте, составленной из полос - сканов, сложенных отдельными элементами - пикселями.

Радиолокационная съемка позволяет получать изображения земной поверхности и объектов, расположенных на ней, независимо от погодных

условий, в дневное и ночное время благодаря принципу активной радиолокации. Радиолокационная съемка Земли ведется в нескольких участках диапазона длин волн (1 см - 1 м) или частот (40 ГГц- 300 МГц). Характер изображения местности на радиолокационном снимке зависит от соотношения между длиной волны и размерами неровностей местности: поверхность может быть в разной степени шероховатой или гладкой, что проявляется в интенсивности обратного сигнала и, соответственно, яркости соответствующего участка на снимке.

Тепловая съемка основана на выявлении тепловых аномалий путем фиксации теплового излучения объектов Земли, обусловленного эндогенным теплом или солнечным излучением. Инфракрасный диапазон спектра электромагнитных колебаний условно делится на три части (в мкм): ближний (0,74-1,35), средний (1,35-3,50), дальний (3,50-1000). Солнечное (внешнее) и эндогенное (внутреннее) тепло нагревает геологические объекты по-разному. ИК-излучение, проходя через атмосферу, избирательно поглощается, в связи с чем тепловую съемку можно вести только в зоне расположения так называемых "окон прозрачности" - местах пропускания ИК-лучей. Опытным путем выделено четыре основных окна прозрачности (в мкм): 0,74-2,40; 3,40-4,20; 8,0-13,0; 30,0-80,0. [9]

Системы ДЗЗ характеризуются несколькими видами разрешений: пространственным, спектральным, радиометрическим и временным. Под термином «разрешение» обычно подразумевается пространственное разрешение. Пространственное разрешение характеризует размер наименьших объектов, различимых на изображении. В зависимости от решаемых задач, могут использоваться данные низкого (более 100 м), среднего (10 – 100 м) и высокого (менее 10 м) разрешений [10]. Снимки низкого пространственного разрешения являются обзорными и позволяют одномоментно охватывать значительные территории – вплоть до целого полушария. Такие данные используются чаще всего в метеорологии, при мониторинге лесных пожаров и других масштабных природных бедствий. Снимки среднего пространственного

разрешения на сегодня – основной источник данных для мониторинга природной среды. Спутники со съемочной аппаратурой, работающей в этом диапазоне пространственных разрешений, запускались и запускаются многими странами – Россией, США, Францией и др., что обеспечивает постоянство и непрерывность наблюдения. Съемка высокого разрешения из космоса до недавнего времени велась почти исключительно в интересах военной разведки, а с воздуха – с целью топографического картографирования. Однако сегодня уже есть несколько коммерчески доступных космических сенсоров высокого разрешения (KBP- 1000, IRS, IKONOS), позволяющих проводить пространственный анализ с большей точностью или уточнять результаты анализа при среднем или низком разрешении.

1.3 Способы мониторинга лесных пожаров

Лесные пожары обнаруживают следующими способами:

- посредством патрулирования лесов и наблюдения за лесными массивами с пожарных наблюдательных вышек, мачт, пунктов (визуальное и инструментальное);
- посредством авиационного патрулирования (визуальное и инструментальное);
- посредством аэрокосмического наблюдения и мониторинга – инструментальное наблюдение с искусственных спутников Земли METEOR, NOAA, TERRAAQUA, SPOT, LANDSAT.

Распределение земель лесного фонда по способам мониторинга (приказ Рослесхоза от 09.07.2009 № 290 «О распределении земель лесного фонда по способам мониторинга пожарной опасности в лесах и зонам осуществления авиационных работ по охране лесов») представлено на рис. 4.

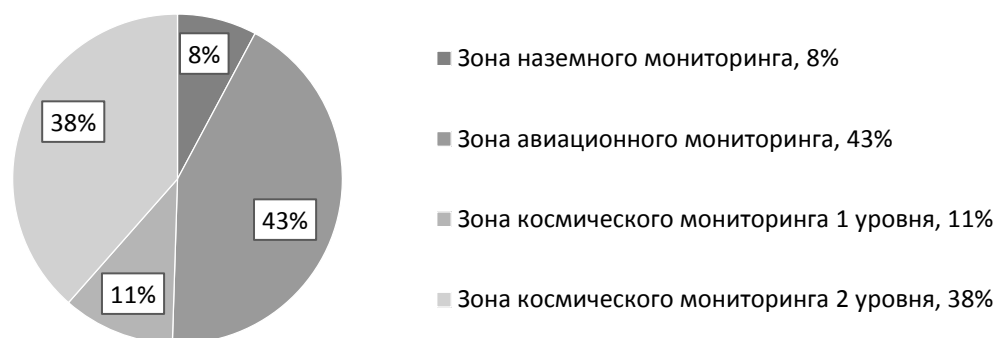


Рисунок 4 – Распределение земель лесного фонда [11]

Наземный мониторинг осуществляется на территории 88,8 млн га (около 8% земель лесного фонда). Критерием для отнесения зоны мониторинга к наземной является возможность доставки групп лесных пожарных на обнаруженный пожар в течение 3 ч. Зона наземного мониторинга располагается, в основном, вокруг населенных пунктов, вдоль дорог и судоходных водоемов.

Наземный мониторинг проводится на автомобилях, лошадях, мотоциклах, а также лесопатрульных комплексах, устанавливаемых, как правило, на шасси автомашин высокой проходимости. Это позволяет не только оперативно добраться до обнаруженного лесного пожара, но и, используя находящиеся на его борту средства тушения, а также воду и огнетушащие химические вещества, быстро ликвидировать очаг возгорания. Если ликвидировать пожар своими силами не представляется возможным, старший группы вызывает дополнительные силы.

Для наземного мониторинга используют пожарно-наблюдательные пункты, павильоны, располагающиеся на господствующих высотах. В равнинной местности эффективны наблюдательные вышки и стационарные телекамеры, устанавливаемые, как правило, на вышках сотовой связи.

Дальность определения места пожара зависит от высоты наблюдения, состояния погоды, прозрачности атмосферы и может быть рассчитана для равнинной местности по формуле (1) [12]:

$$L = 3,85(h_1 - h_2), \quad (1)$$

где L – дальность видимого горизонта, км;

h_1 и h_2 – высоты двух взаимовидимых точек, м.

На практике L не превышает 24 км, при обычном состоянии атмосферы – 8–14 км. Перспективным направлением в развитии систем видеонаблюдения на вышках является автоматизация процессов обнаружения. В этом случае процессы поиска и выявления загораний полностью автоматизированы и контролировать работу нескольких десятков камер одновременно может один человек.

Однако, несмотря на прогресс, технические характеристики теле- и видеокамер отстают от возможностей человека: компьютеры не могут принимать решение. Поэтому участие людей при патрулировании или наблюдении за лесопожарной обстановкой пока исключить невозможно.

Основные недостатки наземных способов обнаружения пожаров:

- необходимость постоянного использования человеческого труда в каждой точке расположения вышки, в течение всего времени пожароопасного сезона и ограничение территории мониторинга количеством установленных вышек. В настоящее время этот метод практически не реализуем из-за отсутствия достаточного количества специалистов на местах;

- высокая стоимость вышки, так как вышка должна быть специально оборудована для постоянного нахождения на ней человека. Для примера: стоимость погонного метра вышки, предназначенной только для размещения оборудования инструментального наблюдения, составляет 11 тыс. рублей за метр высоты, а стоимость пожарной вышки для визуального наблюдения составляет более 50 тыс. р. за погонный метр (т. е. в целом около 2 млн рублей)

[13]. По этой причине пожарные вышки не обновлялись уже более 20 лет, и большинство из них уже не могут быть использованы из-за аварийного технического состояния.

В настоящее время учеными из Нижнего Новгорода (компания ООО «Дистанционные системы контроля»), разработана система распределенного видеонаблюдения для решения задачи раннего обнаружения лесных пожаров. Система названа «Лесной дозор».

К преимуществам этого способа раннего обнаружения пожаров можно отнести простоту самого метода и достаточно высокую оперативность (при наличии благоприятных погодных условий), а также сохранившуюся до сегодняшних дней инфраструктуру пожарных вышек, вышек операторов сотовой связи, провайдеров связи, телевизионных, радиовещательных, которые можно использовать.

«Лесной дозор» работает следующим образом. На неспециализированных высотных сооружениях размещают управляемые видеокамеры с широким диапазоном приближения изображения и возможностью дистанционного управления через сеть Интернет (вращение, приближение, удаление, запись). В любом удобном месте размещается центр контроля (с возможностью высокоскоростного подключения в сеть Интернет), где располагается оператор и с помощью специального программного обеспечения управляет системой камер и обнаруживает пожар.

Основные функциональные возможности системы:

- возможность доступа к системе из любого центра контроля, при наличии подключения в сеть Интернет на требуемой скорости с достаточным количеством трафика;

- дистанционное управление видеокамерами, изменение их ориентации по азимуту и высоте, изменение зума, разрешения и качества видеоизображения;

- возможность работы с картой: отображение на карте квартального слоя, а также различных объектов, предназначенных для выполнения процедур по

мониторингу леса; представление информации о местоположении видеокамер и их текущей ориентации; определение направления на видимый пожар с одной камеры и координат очага возгорания с нескольких камер;

- возможность определения наиболее пожароопасных территорий по показателям пожарной опасности леса (по условиям погоды);

- быстрый обмен оперативными сообщениями о сложившейся ситуации с другими операторами и группами операторов в рамках выполнения задач по обнаружению и ликвидации пожаров.

Основные характеристики системы видеомониторинга «Лесной дозор» [14]:

- радиус обзора одной точки мониторинга: ~ 30 км;
- максимальная ошибка определения местоположения очага возгорания: +/- 250 м;
- время, требуемое на обзор одной точки мониторинга: ~ 30 минут;
- пространственное разрешение: ~ 40 см/пиксель.

Мониторинг равнинной местности с наблюдательной вышки высотой 30-40 метров с радиусом обзора 30 км позволяет контролировать территорию площадью 2 826 км².

Авиационный мониторинг осуществляется на транспортно-недоступных территориях на площади 489,4 млн га (42,7% земель лесного фонда). Полеты невозможны при неблагоприятных погодных условиях: сильном ветре, грозе, тумане, низкой облачности. Препятствием для патрулирования является задымленность территории, возникает ряд вопросов и в случае патрулирования в горной местности. При наблюдении с летательных аппаратов контролируется относительно небольшая площадь; скорости самолетов и вертолетов, используемых сейчас на патрулировании, сравнительно невелики. При визуальном определении площади пожара и его границ могут быть допущены большие неточности, а скрытые (не дающие видимого дыма) очаги горения не обнаруживаются.

В авиационном патрулировании лесов Российской Федерации ежегодно задействуется более 300 воздушных судов. Однако надо отметить, что основным недостатком способа авиапатрулирования является очень высокая стоимость летного часа. Например, летный час самолета Ан-2 стоит около 55 тыс. рублей к тому же этот самолет уже давно снят с производства, и его заменяют самолетом Ту-214ОН, стоимость летного часа которого составляет более 27 тыс. р [15]. Кроме того, необходим специально обученный персонал (штурманы), которые непосредственно определяют маршрут полета, визуально обнаруживают места возгорания и определяют координаты пожара. Вести непрерывный авиа-мониторинг большой территории также невозможно, и это может явиться причиной позднего обнаружения пожара.

Основное достоинство авиационного патрулирования заключается в высокой оперативности и возможности выбора траектории и высоты наблюдения. Самолет Ту-214ОН имеет дальность полета до 4200 км на высотах от 1,5 до 11 км и обеспечивает полосу обзора оптическими и радиолокационными средствами до 50 км, развивая скорость от 350 до 820 км/ч [16]. Таким образом, площадь наблюдения авиационным способом составляет 210 тыс. км². Время, за которое самолет способен проанализировать на наличие лесного пожара территорию площадью 210 тыс. км², равно 5 часов при максимальной скорости 840 км/ч.

Для обнаружения лесных пожаров на небольших по площади территориях могут успешно применяться беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Портативные беспилотные вертолеты типа «мультикоптеры» (квадрокоптеры, гексакоптеры и т.п.) способны решать задачи «посмотреть за холм» или работать в режиме наблюдательной «вышки» при проведении наземного патрулирования лесопожарным подразделением. По состоянию на начало 2014 г., в России организации лесного хозяйства использовали более 40 различных комплексов БПЛА.

И хотя использование данных аппаратов существенно экономит финансовые средства за счет отсутствия необходимости использования всего автопарка лесничества и расходов ГСМ для патрулирования, использование БПЛА самолетного типа «Zala 421-04М» выявили некоторые недостатки, требующие их устранения для качественной работы [17]:

- механическая вибрация, влияющая на качество снимков;
- устойчивость полета аппарата, зависящая от скорости ветра;
- существенные ограничения радиуса для радиоканала не позволяют использовать аппараты для контроля большой территории, несмотря на большую дальность и продолжительность полета;
- необходимость наличия взлетно-посадочной дорожки длиной до 100 м;
- недостаточный радиус обзора – до 15 км;
- ограниченная длительность полета – 20–30 минут.

В картографии в зависимости от видов летательных аппаратов, высоты аэрофотосъемки, целей и задач выполнения аэрофотосъемки материалы ДЗЗ с БПЛА создаются с масштабом 1:25000-1:10000. При контроле территории с помощью использования БПЛА с использованием съемочной аппаратуры Z-16Ф2 позволяет обнаружить малые очаги возгорания, так как разрешение съемки равно 250 см/пиксель, а точность определения местоположения равна +/- 2,5 м. [18]

Космический мониторинг лесных пожаров решает задачи наблюдения за труднодоступными территориями. Для мониторинга пожарной опасности в лесах и максимальной эффективности использования ИСДМ-Рослесхоз контроль за горимостью лесов с 2005 г. осуществляется с помощью космических средств.

Космические средства с достаточной уверенностью позволяют обнаружить лесной пожар на площади от 10–15 га, когда район пожара не закрыт облачностью. Основная задача космического лесопожарного

мониторинга – обеспечение органов управления лесного хозяйства в субъектах Российской Федерации оперативной информацией о лесопожарной обстановке.

Кроме того, существует немаловажная проблема, заключающаяся в получении безоблачных данных, так как качественные снимки высокого пространственного разрешения возможно получить при наличии облачности не более 15% [19].

Земли лесного фонда, на которых осуществляется космический мониторинг лесных пожаров, делится на два уровня:

– 1-й уровень – удаленные территории (11% земель лесного фонда), на которых плановое авиационное патрулирование не проводится, наземные и авиационные зоны не выделяются. Тушение лесных пожаров может осуществляться с применением авиационных сил и средств. При высоких классах пожарной опасности или возникновении горимости лесов на всей охраняемой территории рекомендуется назначение патрульных полетов;

– 2-й уровень – удаленные и труднодоступные территории (38,5% земель лесного фонда), на которых авиапатрулирование не проводится, а тушение лесных пожаров выполняется только при наличии явной угрозы населенным пунктам или объектам экономики. Основным способом обнаружения лесных пожаров являются данные ИСДМ-Рослесхоз.

Информация, получаемая с помощью ИСДМ-Рослесхоз [20]:

а) мониторинг лесных пожаров:

- 1) детектирование очагов лесных пожаров;
- 2) мониторинг и контроль динамики их распространения;
- 3) прогнозирование распространения отдельных очагов;

б) мониторинг пожарной опасности:

- 1) оценка и прогноз пожарной опасности по условиям погоды;
- 2) оценка и прогнозирование вероятности возникновения и распространения лесных пожаров;

3) районирование пожарных режимов, оценка риска и ущерба от пожаров и др.;

в) оценка и учет пройденной пожаром площади:

- 1) оперативный учет по тепловым аномалиям;
- 2) определение площади по изменению состояния растительности;
- 3) оценка степени повреждения огнем лесов;
- 4) уточнение площадей по данным высокого разрешения;

г) информационная поддержка тушения лесных пожаров:

- 1) оценка сил и средств, задействованных на тушении пожаров;
- 2) оптимизация маневрирования силами и средствами с учетом текущей пожарной опасности по условиям погоды;

3) определение причин возникновения крупных лесных пожаров;

д) учет крупных лесных пожаров:

- 1) оценка площадей крупных лесных пожаров (более 500 га);
- 2) сопоставление с данными по площадям пожаров субъектов Российской Федерации;
- 3) оценка площадей свежих гарей и гарей прошлых лет (в стадии зарастания) для государственного лесного реестра.

Доступ к системе ИСДМ-Рослесхоз бесплатный, информацией ежедневно пользуются сотни заинтересованных организаций лесного профиля и смежных отраслей, в том числе и правоохранительные органы. Вход в систему осуществляется по персональному логину и паролю, выдаваемому Федеральной диспетчерской службой Рослесхоза.

В настоящее время в ИСДМ Рослесхоз использует спутниковые данные, получаемые с нескольких приборов, установленных на спутниках NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT, а также отечественные спутники МЕТЕОР, РЕСУРС и КАНОПУС (табл. 2). Некоторые технические характеристики приборов, установленных на спутниках и диапазон длин волн, с помощью которых производят детектирование, представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 2 – Спутники, приборы и получаемая информация

Спутник	Прибор	Использование данных, получаемых с приборов
NOAA	AVHRR	Детектирование подозрений на действующие пожары и построения различных изображений облачности
TERRA AQUA	MODIS	Детектирование подозрений на действующие пожары и построения различных изображений облачности; оперативная оценка площадей, пройденных огнем
METEOP	МСУ-Э	Выборочный контроль площадей, пройденных огнем; верификация оценок, полученных на основе данных SPOT-VGT (Vegetation); уточнение картографических основ
LANDSAT	LANDSAT ETM+	Выборочный контроль площадей, пройденных огнем; верификация оценок, полученных на основе данных SPOT-VGT (Vegetation); уточнение картографических основ
SPOT	SPOT-VGT	Оценка площадей, пройденных огнем; оценка последствий лесных пожаров

Таблица 3 – Технические данные приборов, установленных на спутниках

Спутник/прибор	NOAA/ AVHRR	TERRA, AQUA/ MODIS	LANDSAT/ TM(ETM+)	TERRA/ ASTER	SPOT/ SPOT-VGT
Пространственное разрешение, м	1100	NIR – 250–1000 SWIR – 500 TIR – 1000	NIR, SWIR – 30 TIR – 60	NIR – 15 SWIR – 30 TIR – 90	1000
Количество спектральных каналов в ИК диапазоне	NIR – 1 SWIR – 1 TIR – 2	NIR – 6 SWIR – 3 TIR – 16	NIR – 1 SWIR – 2 TIR – 1	NIR – 1 SWIR – 6 TIR – 5	Red Blue NIR – 1 SWIR

Таблица 4 – Диапазоны длин волн. Используемые для детектирования сигналов

Диапазон		Сокращения	
Русский	Английский	Русский	Английский
Ультрафиолетовый	Ultraviolet	УФ	
Видимый	Visible	В	UV
Инфракрасный	Infrared	ИК	VIS
Ближний ИК	Near Infrared	БИК	NIR
Средний ИК	Short Wave Infrared	СИК	SWIR
Дальний ИК	Mid Wave Infrared	ДИК	MWIR
Тепловой ИК	Thermal Infrared	ТИК	TIR
Микроволной	Microwave	МВ	MW

Данные с каждой из этих систем приходят не реже шести раз в сутки. Данные со спутников этих серий можно использовать как автономно, так и совместно.

В рамках осуществления мониторинга пожаров используют различные методы. Детектирование пожаров основано на обнаружении повышения локальной температуры и яркости. Обнаружение пожаров на снимках из космоса возможно благодаря наличию разнице температур земной поверхности и очага пожара, это, в свою очередь, приводит к разнице в тепловом излучении объектов пожара в тысячи раз. При съемке тепловой аппаратурой с пространственным разрешением 1 км, можно обнаружить очаг пожара площадью в 100 м², а также зону тления площадью в 900 м². При визуальном выявлении пожара определение осуществляют по наличию такого признака присутствия очага горения в зоне обзора, как дымовой шлейф [21].

В качестве недостатков спутникового мониторинга необходимо отметить большую площадь минимально обнаруживаемого очага возгорания, которая колеблется от 20 до 50 га, невысокую периодичность получения данных (несколько раз в сутки) и сильное влияние погодных условий.

Целевая аппаратура MODIS спутников Terra, Aqua позволяет фиксировать снимки с пространственным разрешением 250-500 м/пиксель,

полоса обзора равна 2300 км. Повторяемость съемки одной территории 4 раза в сутки, а производительность съемочной аппаратуры достигает до 700тыс. км². в сутки. Точность геопозиционирования на сегодняшний день равна +/- 4-25 м [22].

Отечественные спутники РЕСУРС, КАНОПУС со съемочной аппаратурой МСУ-Э, МСУ-СК позволяют получать снимки с пространственным разрешением равной 90 см/пиксель. Периодичность прохождения спутника над одной и той же точкой над поверхностью Земли называется периодичностью съемки, у спутника РЕСУРС она равна 6 раз в сутки. [23].

Но при всех недостатках спутниковый мониторинг необходим в случае больших лесных территорий и при отсутствии возможности мониторинга другими способами (стоимость спутникового мониторинга также невысока). Информация, полученная по результатам спутниковой съемки, важна для мониторинга крупных пожаров и оценки их последствий.

2 Сравнительный анализ способов дистанционного обнаружения лесных пожаров

2.1 Методы анализа способов дистанционного обнаружения лесных пожаров

Оптимальный выбор объекта предполагает какую-то количественную оценку его качества, учитывающую некоторые критерии. Другими терминами, используемыми для критериев, являются локальные критерии, показатели, показатели качества, целевые функции, факторы и т.п. Задача оценки качества относится к многокритериальным задачам оптимизации.

Известно множество подходов к решению таких задач [24]:

- применение теории полезности для многокритериального выбора альтернатив из дискретного множества в условиях риска и неопределенности;
- сведение многокритериальной задачи к задаче скалярной оптимизации с помощью некоторой свертки векторного критерия;
- разработка человеко-машинных процедур решения многокритериальных задач оптимизации в интерактивном режиме и др.

Можно выделить следующие основные проблемы, возникающие при оценке объектов по многим критериям:

- противоречивость критериев: улучшение по одному критерию обычно приводит к ухудшению по каким-либо другим критериям;
- невозможность аналитического (в виде формул) выражения связей между оценками по разным критериям;
- оценки по различным критериям имеют разный вид: числовые, содержательные («отлично», «хорошо», «да-нет» и т.д.), балльные, в виде ранжирований и т.д. В общем случае под нечисловыми данными понимают элементы пространств, не являющихся линейными (векторными), в которых нет операций сложения элементов и их умножения на действительное число;

- числовые оценки отличаются по размерности (соответствуют разным физическим величинам и измеряются в разных единицах), по направленности (одни критерии требуется минимизировать, другие – максимизировать), по диапазону значений;

- различие критериев по важности.

Основной способ снятия этих проблем в процессе оценивания объектов – выявление и учет субъективных суждений эксперта. Для этого требуется следующая информация:

- перечень сравниваемых объектов;
- перечень критериев, по которым будет проводиться сравнение;
- оценки объектов по критериям;
- суждения о важности критериев (т.е. информация о том, какие критерии важнее, какие – менее важны).

Для каждого объекта рассчитывается некоторая обобщенная оценка, в которой учитываются оценки по всем критериям. Для приведения оценок по различным критериям к единой форме и получения обобщенной оценки объекта используются следующие основные методы [25]:

- переход от оценок различного вида к экспертным оценкам. Они могут указываться в виде балльных оценок, в долях единицы, в виде парных сравнений и т.д. Примером перехода к экспертным оценкам (в виде парных сравнений) является метод анализа иерархий;

- для числовых оценок обычно выполняется переход к оценкам, имеющим значения от 0 до 1 и направленным на максимум (т.е. оценок, имеющих смысл «чем больше, тем лучше»). Обычно лучшей оценке по критерию соответствует значение 1;

- для словесных оценок выполняется переход к числовой форме по следующим правилам: оценке «отлично» соответствуют числовые значения от 0,8 до 1; «хорошо» – от 0,63 до 0,8; «удовлетворительно» – от 0,37 до 0,63; «плохо» – от 0,2 до 0,37; «очень плохо» – от 0 до 0,2. Числовая оценка выставляется человеком (экспертом), исходя из его субъективных суждений.

Например, если по некоторому критерию два объекта имеют оценку «хорошо», но один из них очень хороший, а другой – немного хуже, то первому (лучшему) можно назначить оценку 0,8, а второму – 0,7;

– для оценок, имеющих вид «да-нет», используются следующие числовые значения: «да» – 0,67; «нет» – 0,33 (если по смыслу задачи оценка «да» нежелательна, то ей соответствует оценка 0,33, а «нет» – 0,67).

Результатом сравнения объектов должна быть некоторая упорядоченная их последовательность, располагающая объекты в порядке их предпочтения. По принципу приведения оценок объектов к единой оценке можно выделить следующие классы методов [25, 26]:

– методы на основе выбора главного критерия. То есть выбирается один основной (главный) критерий, а на остальные критерии, как правило, накладываются ограничения. К этому же классу следует отнести методы, называемые «методами на основе лексикографического упорядочения критериев». В этих методах объекты сначала упорядочиваются по одному (главному) критерию; если по данному критерию оказывается несколько эквивалентных объектов, то используется следующий по важности критерий, и т.д. Методы этого класса достаточно просты. Однако они неприменимы для задач, в которых требуется учитывать несколько критериев, близких по важности;

– методы на основе компенсации критериев. Принцип работы этих методов состоит в том, что от эксперта требуется указать, какая величина выигрыша по одному критерию компенсирует определенный (заданный) проигрыш по другому критерию. Однако указание таких величин компенсации крайне сложно для человека. Поэтому такие методы не нашли широкого применения;

– методы на основе вычисления обобщенных оценок (обобщенного критерия). Принцип работы этих методов состоит в вычислении обобщенной оценки для каждого из объектов на основе их оценок по отдельным критериям. Один из таких методов – метод комплексной оценки. Достоинство таких

методов – небольшой объем информации, требуемый от эксперта. Эти методы нашли широкое применение и реализованы во многих программных продуктах. В то же время они имеют ряд существенных недостатков:

1) методы этого класса не позволяют в достаточной мере учесть субъективные суждения эксперта о превосходстве объектов друг над другом, о желательности (или нежелательности) значений критериев и т.д.;

2) применение этих методов затрудняется при использовании критериев с нечисловыми оценками (словесные оценки, оценки «да-нет», оценки в виде ранжирований объектов и т.д.);

– методы на основе попарного сравнения объектов. При использовании таких методов для каждой пары объектов определяется оценка превосходства одного объекта над другим; эта оценка может непосредственно указываться человеком или вычисляться на основе оценок по отдельным критериям. Такие методы обладают следующими достоинствами:

1) возможность полного учета суждений эксперта об объектах;

2) возможность использования оценок любых видов: числовых, содержательных, «да-нет» и т.д.

Основной недостаток методов этого класса – необходимость большого количества парных сравнений, т.е. большой объем работы для человека (эксперта).

Эффективное проведение мониторинга пожарной опасности в лесах позволяет выявлять очаги пожаров на ранней стадии. Своевременное, то есть в кратчайший срок возникновения, обнаружение лесного пожара дает приступить к его тушению в начале развития, что упрощает задачу и значительно снижает затраты и убытки.

Для проведения сравнительного анализа были выбраны основные критерии, по которым можно оценить способы мониторинга лесных пожаров:

- площадь наблюдаемой территории;
- пространственное разрешение (размер пиксела) снимка;
- время обработки данных;

– точность определения местоположения.

Это основные критерии, так как от них зависит скорость реагирования, и оперативность принятия мер по устранению очагов возгорания.

Для определения веса критериев, представляющие собой числовые оценки их важности используем метод непосредственной оценки, который представляет собой процедуру приписывания объектам числовых значений в шкале интервалов. Это значение соответствует степени влияния того или иного объекта на наблюдаемый результат. В процессе сравнения эксперт должен поставить в соответствие каждому объекту точку на непрерывной числовой оси, например, на отрезке $[0; 1]$. Естественно, что эквивалентным по воздействиям объектам приписывается одно и тоже число.

Оценки объектов по критериям приводятся к безразмерному виду. Это преобразование выполняется по-разному в зависимости от вида и направленности критерия:

– для критериев, подлежащих максимизации, все оценки объектов по данному критерию делятся на максимальную оценку;

– для критериев, подлежащих минимизации, из оценок по данному критерию выбирается минимальная, и она делится на все оценки объектов по данному критерию;

– для содержательных (словесных) критериев, выполняется переход к числовым оценкам.

В результате находятся комплексные оценки объектов (суммы взвешенных оценок), где лучшим является с большей комплексной оценкой.

2.2 Сравнительный анализ способов дистанционного обнаружения лесных пожаров

Для того, чтобы осуществить сравнительный анализ способов мониторинга лесных пожаров, необходимо определить значения по выбранным критериям. Исходя из информации первой главы, занесем данные в таблицу 5.

Таблица 5 – Сравнительная таблица способов мониторинга

Критерий	Наземный	Авиационный	Космический
Площадь наблюдения за сутки, км ²	2826	210000	700000
Пространственное разрешение получаемых данных, см/пиксель	40	80	90
Время, необходимое для обновления данных, мин	30	300	240
Точность определения местоположения, м	250	2,5	14

Введем обозначения критериев: К1 – площадь наблюдения, К2 – пространственное разрешение, К3 – время обработки данных, К4 – точность определения местоположения.

Матрица оценок критериев приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Матрица оценок критериев

	К1	К2	К3	К4
Оценка критерия	10	7	8	8

После вычисления средних значений и выполнения нормализации получаем следующие веса критериев: $V1 = 0,3$, $V2 = 0,21$, $V3 = 0,24$, $V4 = 0,24$.

Выполним переход к безразмерным оценкам.

Критерий К1 (площадь наблюдения) подлежит максимизации. Максимальная оценка по этому критерию равна 700 000. Все оценки по данному критерию делятся на эту оценку:

$$P11 = 2826/700\ 000 = 0,004;$$

$$P12 = 210\ 000/700\ 000 = 0,3;$$

$$P13 = 700\ 000/700\ 000 = 1.$$

Здесь через P_{ij} обозначены безразмерные оценки (i – номер критерия, j – номер объекта).

Критерий К2 (пространственное разрешение) подлежит минимизации (чем меньше разрешение, тем лучше). Минимальная оценка по данному критерию равна 40. Эта оценка делится на все оценки по данному критерию:

$$P_{21} = 40/40 = 1;$$

$$P_{22} = 40/80 = 0,5;$$

$$P_{23} = 40/90 = 0,44.$$

Критерий К3 (время обработки данных) подлежит минимизации. Минимальная оценка по данному критерию равна 30. Эта оценка делится на все оценки по данному критерию:

$$P_{31} = 30/30 = 1;$$

$$P_{32} = 30/300 = 0,1;$$

$$P_{33} = 30/240 = 0,125.$$

Критерий К4 (точность определения местоположения) подлежит минимизации. Минимальная оценка по данному критерию равна 2,5. Эта оценка делится на все оценки по данному критерию:

$$P_{41} = 2,5/250 = 0,01;$$

$$P_{42} = 2,5/2,5 = 1;$$

$$P_{43} = 2,5/14 = 0,18.$$

Безразмерные оценки сводятся в таблицу 7

Таблица 7 – Безразмерные оценки

	К1	К2	К3	К4
Наземный	0,00	1,00	1,00	0,01
Авиационный	0,30	0,5	0,10	1,00
Космический	1,00	0,44	0,13	0,18

Таким образом, выполнен переход от разнообразных оценок по критериям к безразмерным оценкам. Все безразмерные оценки имеют значения

в пределах от 0 до 1. Чем больше значение безразмерной оценки, тем лучше объект (по любому критерию).

Находятся взвешенные оценки объектов (форм. (2)):

$$E_{ij} = P_{ij} * W_i, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N \quad (2)$$

Взвешенные оценки для данного примера приведены в таблице 8

Таблица 8 – Взвешенные оценки

	K1	K2	K3	K4
Наземный	0,00	0,21	0,24	0,00
Авиационный	0,09	0,11	0,02	0,24
Космический	0,30	0,09	0,03	0,04

Далее находятся комплексные оценки объектов (форм. (3)):

$$E_j = \sum_{i=1}^M E_{ij}, j = 1, \dots, N \quad (3)$$

В результате применения формулы (3) комплексные оценки способов мониторинга равняются:

$$E_1=0,458$$

$$E_2=0,464$$

$$E_3=0,471$$

В результате сравнительного анализа способов мониторинга наиболее оптимальным является космический мониторинг, так как данный способ имеет наибольшую комплексную оценку.

3 Экономический анализ применения ДЗЗ в целях пожаробезопасности

3.1 Выбор метода детектирования лесного пожара со спутника

Известен метод дистанционного обнаружения лесных пожаров из космоса с помощью телевизионных систем, установленных на борту космического аппарата и передающих снимки дымовых шлейфов. Наличие дымовых шлейфов явно видимы на изображениях среднего (TERRA/MODIS) и низкого (NOAA) разрешения. Наличие таких шлейфов практически стопроцентно подтверждает факт горения. Однако данный метод становится не работоспособным в присутствии облаков и в темное время суток [26]. Пример такого шлейфа на стандартных информационных продуктах ИСДМ Рослесхоз представлен на рис. 5.

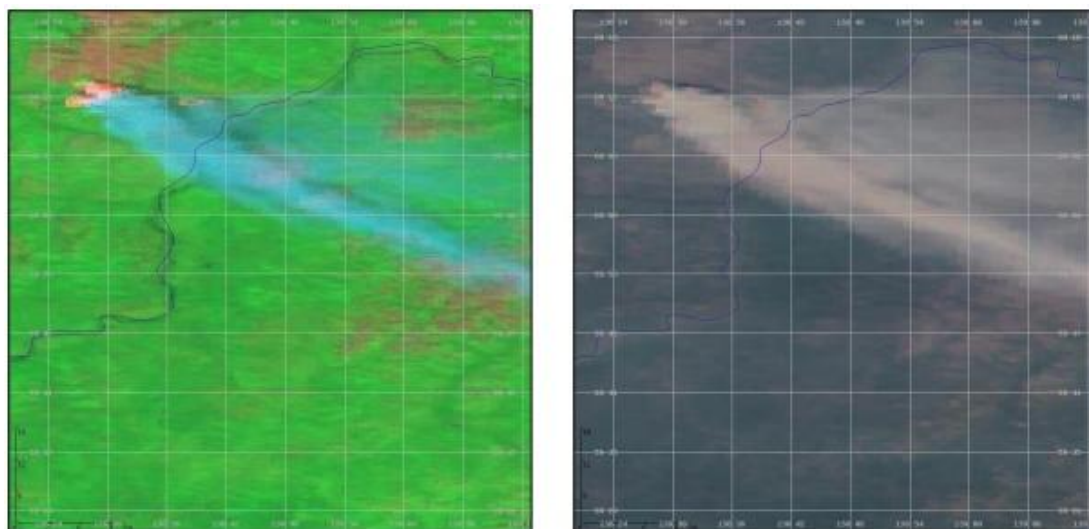


Рисунок 5 – Пример изображений дыма от действующего пожара при разном цветовом синтезе каналов прибора MODIS (спутник Terra)

Существует метод дистанционного обнаружения лесных пожаров из космоса с помощью ИК-радиометрами. Метод включает зондирование подстилающей поверхности Земли космическими средствами путем приема и

анализа ИК теплового излучения земной поверхности в окнах прозрачности атмосферы на длинах волн более 3 мкм [27].

Данный метод дистанционного обнаружения пожаров позволяет определить радиационную температуру участков Земли, основываясь на зависимости интенсивности излучения абсолютно черного тела от длины волны и температуры согласно закону Планка, и идентифицировать очаги пожаров по контрасту температур в любое время суток.

Однако данный метод становится неработоспособным при плотной облачности с оптической толщей более 2. Кроме того, контрасты радиационных температур, сильно зависящие, в частности, от увлажненности почв, могут давать «ложную» идентификацию лесных пожаров.

Предлагаемый метод на основе опубликованного патента представляет собой обнаружение лесного пожара из космоса по информации о нагретых при температуре пожара атмосферных газов в ИК-диапазоне спектра. Информацию о нагретых при температуре пожара атмосферных газах в ИК-диапазоне спектра в окнах прозрачности атмосферы получают путем зондирования подстилающей поверхности Земли космическими средствами.

Техническим результатом, достигаемым при использовании изобретения, является повышение достоверности путем исключения «ложной» идентификации пожаров и увеличение чувствительности в условиях плотной облачности.

Предлагаемый метод дистанционного обнаружения лесных пожаров включает зондирование подстилающей поверхности леса космическими средствами путем приема и анализа ИК теплового излучения в окнах прозрачности атмосферы.

В отличие от известного, в предлагаемом методе прием сигнала осуществляется когерентным приемником в узком спектральном интервале, совпадающем с линией излучения атмосферного газа в «горячей» колебательно-вращательной полосе.

В патенте №2423160 (заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН)) описан технический результат, который достигается тем, что регистрация с помощью когерентного приемника линии излучения атмосферного газа в «горячей» колебательно-вращательной полосе возможна только при высоких температурах пожара свыше 1000°C , а при нормальных атмосферных температурах линия не идентифицируется. То есть регистрация линии излучения атмосферного газа в «горячей» колебательно-вращательной полосе однозначно указывает на наличие высоких температур, что приводит к повышению достоверности, т.к. исключается необходимость в учете контрастов радиационных температур, которые сильно зависят, в частности, от увлажненности почв. Когерентный прием сигнала приводит к увеличению избирательности и чувствительности способа в условиях плотной облачности.

При высоте спутника около 1000 км и угле зрения приемного объектива 10^{-3} рад контролируемый участок земной поверхности протяженностью 1 км можно рассматривать как точечный источник, т.е. принимаемая волна с этого участка излучения является когерентной. В качестве опорного генератора при когерентном приеме используется CO_2 -лазер низкого давления, генерирующий на том же горячем переходе в полосе 01^11-11^10 (03^10). При отсутствии пожара интенсивность горячей линии CO_2 при нормальных атмосферных температурах мизерна и сигнал не регистрируется. В случае пожара при температурах свыше 1000°C интенсивность горячей линии CO_2 усиливается экспоненциально (она становится сопоставима с интенсивностью основных линий CO_2 при нормальных температурах) и сигнал устойчиво регистрируется из космоса. Наличие облачности уменьшает когерентность принимаемого сигнала из-за многократного рассеяния в облаках. Когерентность сохраняется только у малой доли однократно рассеянного сигнала, которая при плотной облачности не превышает 1%. Однако за счет высокой чувствительности и избирательности когерентного приемника, превышающей на три-пять порядков

чувствительность прямого детектирования сигнала, этой доли достаточно для устойчивой регистрации горячей линии CO_2 в условиях плотной облачности [28].

Заявляемый метод может быть реализован с использованием, например, системы орбитальных спутников наблюдения типа NOAA (США) с установленными на них сканирующими радиометрами типа AVHRR с добавлением для когерентного приема в качестве опорного генератора CO_2 -лазера, настроенного на излучение линии в горячей полосе. Зарегистрированный радиометром сигнал в режиме открытого доступа принимается наземными пунктами приема и анализируется.

3.2 Экономический анализ

Предлагаемый метод может быть использован для обнаружения лесных пожаров из космоса по полученной информации о нагретых при температуре пожара атмосферных газах в ИК-диапазоне спектра. Прием и анализ ИК теплового излучения земной поверхности осуществляют когерентным приемником в узком спектральном интервале, совпадающем с линией излучения атмосферного газа в «горячей» колебательно-вращательной полосе спектра. Изобретение обеспечивает исключение ложной идентификации пожаров и увеличение чувствительности в условиях плотной облачности.

Рассчитаем экономический эффект при внедрении данного приемника в двух случаях.

3.2.1 Исключение «ложной» информации

Основным признаком наличия пожара являются «горячие точки», которые детектируются по спутниковым данным. Однако, однократное обнаружение «горячей точки» еще не является стопроцентным подтверждением того, что наблюдается именно природный пожар.

Многократное обнаружение «горячих точек» в районе действия пожара по данным различных способов обнаружения уже достаточно надежно подтверждают, что наблюдаемые горячие точки являются пожаром, но в таком случае теряется время, за которое малый по площади пожар может перерасти в пожар катастрофических размеров. В процессе работы системы раннего обнаружения лесных пожаров могут происходить ошибки двух видов – ложная тревога и пропуск возгорания.

Для расчета доли «ложных» пожаров из статистики были взяты субъекты РФ Уральского федерального округа, Сибирского федерального округа и Дальневосточного федерального округа, где были зафиксированы «ложные» пожары на территории лесной части (табл. 9).

Таблица 9 – Сравнительная оценка информации о лесных пожарах [29]

Название субъекта РФ	Данные космического мониторинга		Данные исполнительных органов	
	Кол-во	Площадь, пройденная огнем, тыс. га	Кол-во	Площадь, пройденная огнем, тыс. га
Уральский федеральный округ				
Курганская область	21	0,2	181	0,3
Свердловская область	24	1,3	273	1,3
Тюменская область	6	0,2	70	0,3
Ханты-Мансийский автономный округ	58	3,6	207	3,2
Челябинская область	43	1,9	372	2
Ямало-Ненецкий автономный округ	16	0,9	81	1
Итого по ФО	168	8,1	1184	8,1
Сибирский федеральный округ				
Алтайский край	34	0,9	187	0,3
Забайкальский край	558	308,5	450	193,3

Окончание таблицы 9

Название субъекта РФ	Данные космического мониторинга		Данные исполнительных органов	
	Кол-во	Площадь, пройденная огнем, тыс. га	Кол-во	Площадь, пройденная огнем, тыс. га
Иркутская область	360	247,3	754	134,8
Кемеровская область	24	1,5	5	0
Красноярский край	322	42,7	881	32,3
Новосибирская область	55	2,2	133	0,5
Омская область	14	0,6	103	0,7
Республика Алтай	0	0	8	0
Республика Бурятия	430	99,7	410	106,8
Республика Тыва	23	1,5	56	1,7
Республика Хакасия	1	0,1	29	0,4
Томская область	52	3,6	144	2,4
Итого по ФО	1873	708,6	3160	473,2
Дальневосточный федеральный округ				
Амурская область	794	849,4	255	311,2
Еврейская автономная область	27	1,5	59	1,4
Камчатский край	57	4,9	18	3,7
Магаданская область	51	20,5	42	6,6
Приморский край	51	1,6	143	3
Республика Саха (Якутия)	36	1,3	81	0,8
Сахалинская область	1	0	12	0
Хабаровский край	88	10	201	4,8
Чукотский автономный округ	18	6,5	21	0,8
Итого по ФО	1123	895,7	832	332,3
ВСЕГО	3164	1612,4	5176	813,6

Доля «ложных» пожаров из общего количества подтвержденных лесных пожаров составляет 38,87%.

Средняя продолжительность авиатрулирования на территории Республики Бурятия равна 4-5 часа, когда стоимость летного часа Ту-214ОН равна 27 тыс. рублей [30, 31]. Таким образом, затраты на авиатрулирование «ложных» пожаров равна $3\,164 \cdot 27 \cdot 4 = 341\,712$ тыс. рублей

С помощью предлагаемого метода можно обнаружить только что возникшие лесные пожары с достоверностью в 33%. Сократится число ложных пожаров до 1708 пожаров в год. Затраты на авиатрулирование «ложных» пожаров с применением когерентного приемника равна $1708 \cdot 27 \cdot 4 = 184\,472$ тыс. рублей

Экономический эффект равен $341\,712 - 184\,472 = 157\,240$ тыс. рублей

3.2.2 Плотная облачность

При плотности облачности, где оптическая толщина равна 2 определение лесного пожара может быть возможным не менее 100 га.

Предлагаемый метод позволяет сократить площадь обнаружения до 70 га

Определим стоимость тушения на 1 га

Таблица 10 – расходы по тушению лесных пожаров на территории Республики Бурятия за 2015 г. [32].

Лесничество	Количество пожаров, шт.	Общая площадь пожаров, га	Средняя площадь пожара, га	Затраты на тушение, млн. руб.	Затраты на 1 га, млн. руб.
Ангойское	37	21720,14	587,03	1203,05	0,055
Бабушкинское	20	11373,25	568,66	642,83	0,057
Байкальское	64	29270,44	457,35	1752,03	0,060
Баргузинское	69	33436,29	484,58	1871,3	0,056
Бичурское	49	25970,82	530,02	1563,49	0,060

Продолжение таблицы 10

Лесничество	Количество пожаров, шт.	Общая площадь пожаров, га	Средняя площадь пожара, га	Затраты на тушение, млн. руб.	Затраты на 1 га, млн. руб.
Буйское	32	17880	558,75	1122,95	0,063
Верхне-Баргузинское	52	28389,12	545,94	1651,71	0,058
Верхне-Талецкое	47	25412,61	540,69	1159,82	0,046
Витимское	61	28405,46	465,66	1622,94	0,057
Гусиноозерское	4	644,5	161,13	88,00	0,137
Джидинское	37	19398,71	524,29	1257,99	0,065
Еравнинское	64	28829,53	450,46	1746,41	0,061
Заиграевское	13	6658,3	512,18	361,81	0,054
Закаменское	50	27296,36	545,93	1590,97	0,058
Заудинское	63	28029,63	444,91	1640,26	0,059
Иволгинское	4	457,21	114,30	29,51	0,065
Кабанское	68	30386,17	446,86	1837,5	0,060
Кижингинское	45	21177,63	470,61	1370,62	0,065
Кикинское	13	6140,94	472,38	232,93	0,038
Кондинское	29	15261,26	526,25	987,2	0,065
Кудунское	5	3625,52	725,10	100,13	0,028
Куйтунское	46	24499	532,59	1559,26	0,064
Курбинское	39	22898,4	587,14	1308,06	0,057
Курумканское	75	32733,31	436,44	1915,91	0,059
Кяхтинское	16	7700,87	481,30	372,56	0,048
Муйское	8	3646,14	455,77	228,59	0,063
Мухоршибирское	57	23393,93	410,42	1671,28	0,071
Окинское	45	23701,9	526,71	1348,36	0,057
Прибайкальское	77	33611,19	436,51	1944,23	0,058
Романовское	30	16179,41	539,31	1023,66	0,063
Северо-Байкальское	71	33294,64	468,94	1871,79	0,056
Селенгинское	22	13217,16	600,78	796,17	0,060
Улан-Удэнское	25	14948,66	597,95	950,34	0,064

Окончание таблицы 10

Лесничество	Количество пожаров, шт.	Общая площадь пожаров, га	Средняя площадь пожара, га	Затраты на тушение, млн. руб.	Затраты на 1 га, млн. руб.
Уоянское	46	24232,83	526,80	1492,34	0,062
Усть-Баргузинское	19	9846,23	518,22	397,81	0,040
Хандагатайское	44	23530,22	534,78	1318,3	0,056
Хоринское	72	33349,77	463,19	1883,59	0,056
ИТОГО	1518	750547,55	494,43	43915,70	0,059

Затраты на тушение 1 га лесных пожаров на территории Республики Бурятия за 2015 год составили 59 тыс. рублей

В среднем 117 из 150 дней пожароопасного периода в Республике Бурятия стоит ясная погода, таким образом на протяжении 33 дней (22% от числа дней пожароопасного периода) обнаруживается пожар площадью не менее 100 га [33].

Рассчитаем среднее количество пожаров в день: $1518/150=10,12$ пожаров/день

Определим среднее количество пожаров, обнаруженных в облачные дни за пожароопасный период: $10*33=330$ пожаров

Таким образом, мы можем определить затраты на тушение при обнаружении пожара площадью не менее 100 га в облачные дни за пожароопасный период: $330*100*59=1\,947\,000$ тыс. рублей

Предлагаемый метод позволяет обнаружить пожар не менее 70 га в облачный день. Таким образом, ущерб после внедрения когерентного приемника за пожароопасный период: $330*70*59=1\,362\,900$ тыс. рублей

Экономический эффект = $1\,947\,000 - 1\,362\,900 = 584\,100$ тыс. рублей

Внедрение предложенного метода позволяет сократить затраты на 584 100 тыс. рублей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны известные способы раннего обнаружения лесных пожаров. Выявлены существенные недостатки этих способов, которые не позволяют выявить лесной пожар своевременно. На основе опубликованного патента предложен оригинальный метод обнаружения лесных пожаров из космоса по полученной информации о нагретых при температуре пожара атмосферных газах в ИК-диапазоне спектра. Информацию о нагретых при температуре пожара атмосферных газах в ИК-диапазоне спектра в окнах прозрачности атмосферы получают путем зондирования подстилающей поверхности Земли космическими средствами. Прием и анализ ИК теплового излучения земной поверхности осуществляют когерентным приемником в узком спектральном интервале, совпадающем с линией излучения атмосферного газа в «горячей» колебательно-вращательной полосе спектра. Этот метод обеспечивает исключение ложной информации и увеличение чувствительности в условиях плотной облачности.

Также был проведен сравнительный анализ способов дистанционного мониторинга лесных пожаров методом комплексной оценки по выбранным критериям, а именно:

- площадь наблюдаемой территории;
- пространственное разрешение снимка;
- время обработки данных;
- точность определения местоположения.

По результатам сравнительного анализа космический мониторинг является наиболее оптимальным с комплексной оценкой равной 0,471.

Результаты вышеописанного анализа показали необходимость совершенствования способов дистанционного обнаружения лесных пожаров. А именно космический мониторинг, главными недостатками которого является зависимость от облачности и фиксация ложной информации о пожаре.

Для усовершенствования космического способа обнаружения лесных пожаров предложен метод, который может быть реализован с использованием системы орбитальных спутников наблюдения типа NOAA (США) с установленными на них сканирующими радиометрами типа AVHRR с добавлением для когерентного приема в качестве опорного генератора CO₂-лазера, настроенного на излучение линии в горячей полосе. Зарегистрированный радиометром сигнал в режиме открытого доступа принимается наземными пунктами приема и анализируется.

Для расчета экономического эффекта от реализации усовершенствованного космического способа мониторинга лесных пожаров посредством внедрения когерентного приемника в узком спектральном канале рассмотрены два случая:

Первый, когда предложенный метод позволяет исключить «ложную» информацию о лесных пожарах. Доля ложных пожаров составляет 38,87%, то есть 2 012 пожаров из 5 176 были ложными. По этой причине затраты на авиапатрулирование составляют 341 712 тыс. рублей. Предложенный метод позволяет сократить процент ложных пожаров на 5%. Экономический эффект внедрения когерентного приемника в узком спектральном канале в случае исключения «ложных» пожаров равен 157 240 тыс. рублей.

Второй, когда предложенный метод позволяет увеличить чувствительность обнаружения пожара при плотной облачности. При плотности облачности, где оптическая толщина равна 2 определение лесного пожара может быть возможным не менее 100 га. Предлагаемый метод позволяет сократить площадь обнаружения до 70 га. Затраты на тушение 1 га на территории Республики Бурятия за 2015 год составили 59 тыс. рублей. Затраты на тушение при обнаружении пожара в облачные дни за пожароопасный период равны 1 947 000 тыс. рублей. Внедрение когерентного приемника позволит сократить затраты на тушение на 584 100 тыс. рублей за счет уменьшения площади обнаружения лесного пожара при плотной облачности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Реестр ослабленных, поврежденных и погибших лесных насаждений на территории Российской Федерации [Электронный ресурс] : Открытые данные Рослесхоза. – Режим доступа: <http://www.rosleshoz.gov.ru/activity/no-fire/docs/projects/20>
2. Отчет о сумме ущерба, нанесенного лесными пожарами за 2015 год [Электронный ресурс] : Открытые данные Рослесхоза. – Режим доступа: <http://www.rosleshoz.gov.ru/activity/no-fire/docs/projects/15>
3. Синельников, А.В. Профилактика возникновения лесных и ландшафтных пожаров в летний пожароопасный период / А.В. Синельников // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2014. – №2. – С. 145-148.
4. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] : база данных содержит ежегодную статистику площади лесных пожаров. – Режим доступа: <http://www.gks.ru>
5. Матвеев, П.М. Лесная пирология: Учебное пособие для студентов специальности 260400 всех форм обучения / А.М. Матвеев, П.М. Матвеев. – Красноярск : СибГТУ, 2002. – 287 с.
6. Залесов, А.С. Классификация лесных пожаров : Методические указания / А.С. Залесов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2011. – 15 с.
7. Заяц, А.М. Разработка мультимедийного Web - приложения мониторинга лесных пожаров / А.М. Заяц, А.А. Логачев / Информационные системы и технологии: теория и практика : сб. науч. тр. / СПбГЛТУ. – Санкт-Петербург, 2012. – № 4. – С. 17-20
8. Каницкая, Л. В. Лесная пирология : учеб. пособие / Л. В. Каницкая. – Иркутск : Издательство БГУЭП, 2013. – 206 с.
9. Новоселова, Н.В. Дистанционные методы исследования: учеб. пособие / Н.В. Новоселова. – Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2010. – 175 с.

10. Пространственное разрешение ДЗЗ [Электронный ресурс] : Геоинформационные системы для бизнеса и общества. – Режим доступа: http://loi.sssc.ru/gis/dataplus/arcrev/Number_17/3_Svoistva.htm
11. «О распределении земель лесного фонда по способам мониторинга пожарной опасности в лесах и зонам осуществления авиационных работ по охране лесов» [Электронный ресурс] : Приказ Рослесхоза от 09.07.2009 г. № 290. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902180700>
12. Иванов, А.В. Лесная пирология: конспект лекций / А.В. Иванов. – Йошкар-Ола : Марийский государственный технический университет, 2010. – 276 с.
13. Мелехов, И. С. Лесная пирология : учеб. пособие по образованию в области лесного дела / И. С. Мелехов, С. И. Душа-Гудым, Е. П. Сергеева. – Москва : МГУЛ, 2008. – 291 с.
14. Характеристики системы «Лесной дозор» [Электронный ресурс] : информ. сайт. – Режим доступа: <http://www.lesdozor.ru/>
15. Маковский, В.М. Перспективы использования беспилотной авиации для обнаружения и мониторинга лесных пожаров в архангельской области / В.М. Маковский, А.А. Елисеев / Моделирование природных и техногенных чрезвычайных ситуаций и рисков их возникновения: синтез достижений технических и социальных наук : сб. науч. тр. / – Архангельск: КИРА, 2016. – С. 34-36.
16. Правоприменение и управление в сфере использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов : учеб. пособ. / А. Н. Бобринский [и др.]. – Москва : Всемирный банк, 2015. – 252 с.
17. Характеристика БПЛА [Электронный ресурс] : информ. сайт. – Режим доступа: <http://zala.aero/zala-421-04/>
18. Возможности авиационного мониторинга [Электронный ресурс] Акционерное общество Балтийское аэрогеодезическое предприятие. Режим доступа: <http://www.balt-agp.ru/services/aerofoto.htm>

19. Шимов, С.В. Технология мониторинга вырубок леса с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения / С.В. Шимов, Ю.В. Никитина // Геоматика. – 2011. – № 4 (13). – С. 49-52
20. Применение информационной системы дистанционного мониторинга «ИСДМ-Рослесхоз» для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации : учеб. пособ. / Р.В. Котельников [и др.]. – Пушкино (МО) : ФГУ «Авиалесоохрана», 2014. – 82 с.
21. Бадмацыренов, Б.В. Мониторинг лесных пожаров на Байкальской природной территории / Б.В. Бадмацыренов, С.Ж. Гулгенов // Актуальные вопросы безопасности в техносфере. – 2013. – №1. – С. 83-85
22. Характеристики аппаратуры MODIS [Электронный ресурс] Пожары – Географический факультет МГУ. – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/2/pozhary.html
23. Периодичность прохождения спутника [Электронный ресурс] Оф. сайт компании «Совзонд». – Режим доступа: <https://sovzond.ru/learning/self-study/faq/>
24. Батищев, Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений: учебное пособие / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
25. Смородинский, С.С. Методы анализа и принятия управленческих решений: учебное пособие / С.С. Смородинский, Н.В. Батин. – Минск: БКУУ, 2000. – 101 с.
26. Барталев, С.А. Сопоставление информации о лесных пожарах по данным спутниковых, наземных и авиационных наблюдений ИСДМ-Рослесхоз / С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – №2. – С. 97-105.
27. Способ мониторинга лесных пожаров [Электронный ресурс] : Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/file/file766.doc>

28. Пат. 2423160 Российская Федерация, МПК А62С 3/02. Способ дистанционного обнаружения лесных пожаров / В.В. Зуев : заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН). – № 2010118042/12 : заявл. 05.05.10 ; опубл. 10.07.11, Бил. №19. – 6 с.

29. Сравнительная оценка информации о лесных пожарах [Электронный ресурс] : Природа Байкала. – Режим доступа: http://nature.baikal.ru/files/943/2016-07-01_9-ISDM.pdf

30. Продолжительность авиапатрулирования [Электронный ресурс] : Байкал Daily. – Режим доступа: <https://www.baikal-daily.ru/news/19/71842>

31. Стоимость летного часа [Электронный ресурс] : Авиация общего назначения. – Режим доступа: https://http://www.aviajournal.com/arhiv/899/st1b_899.html

32. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году [Электронный ресурс] : Статистический сборник. / Москва, [2016]. – Режим доступа: <http://vsepropb.ru/wp-content/uploads/2017/03/sbornik2015statistika.pdf>

33. Среднее количество ясных и облачных дней в пожароопасный период [Электронный ресурс] : Статистика погоды. – Режим доступа: https://pogoda.turtella.ru/Russia/Republik_Buryatia/